



高能实验中的离线分析简介

童 国 梁

在每个高能物理实验中心,当加速器的运行告一阶段或实验上有某些重要发现时,常组织全所性的物理论论会.在讨论会上,各个实验组都将宣布该组最新的实验成果,报告自己的工作.这种讨论会是全所隆重的日子,它吸引着所有的科学工作者.参加讨论会的,不仅有年长的学者权威,也有年轻的研究生.为了争取在讨论会上拿出最漂亮的实验结果,各实验组的分析工作(离线分析)经常通宵达旦地进行.本文简介高能物理实验中的数据分析工作,同时用某些例子说明蒙特卡罗(Monte Carlo)方法在高能物理研究中的应用.

§ 1. 数据获取过程

高能物理实验,是实验者根据一定的研究目的,选用合适的人射粒子和靶粒子,通过专门设计的探测装置,对反应终态粒子及其衍生粒子的探测,来研究入射粒子与靶粒子之间发生的物理过程及其规律.我们以丁肇中小组的马克-杰实验为例来说明这个问题.1.为了测量弱作用与电磁作用的相干效应,实验探测了终态 μ 子对的极角 θ 的不对称性;2.为了寻找新的层子,探测了终态为强子的事例,测出这种事例的全截面,并对这些事例作冲度分析;3.为了研究胶子辐射的过程,对强子事例作了能流分布以及扁度分析;4.为了作量子电动力学的检验,所以就 必须 探测 $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$, $\mu^+\mu^-$ 和 $\tau^+\tau^-$ 的过程,由于重轻子 τ^+ , τ^- 是不稳定的,很快衰变为单个 μ 子事例,就必须研究单 μ 子事例…….综上所述,为了达到实验的目的就要求马克-杰实验记录终态分别为强子、双 μ 子、单 μ 子、大角度的巴巴散射($e^+e^- \rightarrow e^+e^-$)和小角度度的巴巴散射事例,此外实验还想研究正负电子通过双光子过程而产生的一些现象,所以实验也记录了该类过程.我们知道,上述的每一种终态都有它的特征面貌,例如伴随巴巴事例会产生相对的两个电磁簇射, μ 子事例有很强的穿透能力,强子事例也有特定的穿透能力,根据这些过程的特征面貌,结合具体的实验装置,就可设计出各类过程的选择标准.在马克-杰实验中,设计了H(强子)、QM(双 μ)、SM(单 μ)、QED(大角度巴巴散射)、MG(小角度的巴巴散射)、GLR(双光子过程)等逻辑触发条件,若某次反应终态满足上列任一种逻辑触发,该事例就被记录下来,通过在线计算机记在磁带上.否则,该事例就被拒绝.图1给出了数据获取过程的比

喻性图示,正负电子对撞,反应的终态有许多类,图中形象地用了各种形状表征它们,但只有特定的几类能通过在线选择而记在磁带上.



图1(a) 正负电子对撞产生各类终态,反应的终态可以是H, QM, SM, QED, MG中的任一类或其它终态

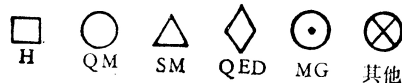


图1(b) 不同类的终态有不同的特征

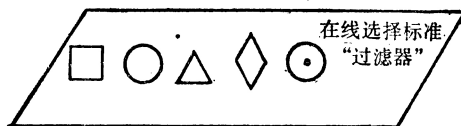


图1(c) 只有满足选择条件的事例才能通过

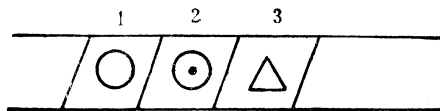


图1(d) 通过在线选择的事例依次记录在磁带上

§ 2. 离线分析过程的一般流程

我们以马克-杰测量 $e^+e^- \rightarrow \gamma$ 强子(正,负电子通过单光子湮灭产生强子)过程的全截面为例介绍离线分析工作的一般流程.

图2 马克-杰组测量强子全截面的一般流程.这里有点想说明一下:(1)正负电子对撞产生的终态有许多种,其中 $e^+ + e^- \xrightarrow{\gamma} h$ (强子)是我们所要研究的过程, $e^+ + e^- \rightarrow \gamma$ 表示反应终态中含有强子,但不是通过单光子湮灭的过程,例如,双光子过程终态也有一定的可能产生强子,并被误认为我们所研究的过程.因此 $e^+e^- \rightarrow \gamma$ 是个沾污过程.图中 $e^+e^- \rightarrow z$ 表示其它过程,该过程很容易与 $e^+e^- \xrightarrow{\gamma} h$ 区分.(2)在流程图,我们用蒙特卡罗方法模拟 $e^+e^- \xrightarrow{\gamma} h$ 的过程来研究我们的装置对该过程的接受率 ϵ_h , 通过模拟 $e^+e^- \rightarrow \gamma$ 的过程来研究沾污过程的本底截面 $\Delta\sigma$. (3)在正负电子对撞实验中,亮度是由巴巴散射的探测定出的.此外我们还必须考虑到辐射修正的影响 Rad. 考虑到了上述各种影响,最后由流程图中的截

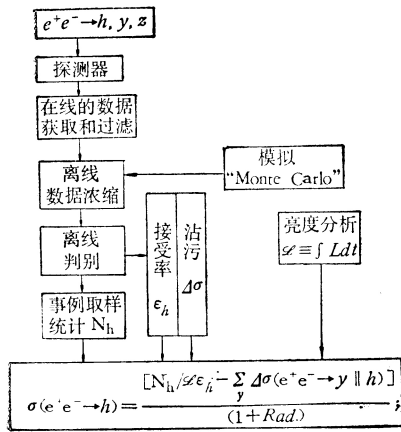


图2 马克-杰分析、测量强子事例全截面的流程示意

去分析的,这里简单介绍一下蒙特卡洛磁带是怎么制成的.一般来说,一个过程的模拟可分成两部分,一部分是相互作用机制的模拟,另一部分是终态粒子在实验装置中的运输过程.下面分这两部分分别介绍.

I. 相互作用机制的模拟 在高能物理中,有些作用机制是比较清楚的,如巴巴散射,但对有些作用机制的认识是逐步深化的.例如,对于 $e^+e^- \rightarrow \gamma$ 强子的过程,人们先后用过相空间模型、 $q\bar{q}$ (正反层子)的双喷注模型、 $q\bar{q}g$ (正反层子、胶子)模型来解释这类实验.在考虑某一态的强子衰变时,当过程中参加的粒子数增多,动力学的影响就变小,若忽略动力学的影响而仅考虑运动学部分的相空间积分,这就是相空间模型.所谓双喷注模型,认为正、负电子湮灭后形成的虚光子物质化为一对正、反层子,这一对方向相反的层子在层子海中产生碎裂过程,形成方向相反的两个喷注. $q\bar{q}g$ 模型认为,当正、负电子的质心能量进一步提高时,虚光子物质化的一对层子中有可能辐射出一个胶子,正、反层子和胶子分别发展为一束强子喷注.在同样的始态条件下,上述几种模型都会随机地给出终态子图象,终态粒子种类、数目、动量、方向等等,当然这些量都是随机的,每一种模型的每一次模拟结果都不会相同,但同一种模型得到的终态情况的统计分布都具有相同的特点.这些都可通过用蒙特卡洛方法模拟计算得出.这儿就不详细介绍了.

实验的重要目的是检验相互作用机制.在 $e^+e^- \rightarrow h$ 的实验中,我们要检验上述的三种模型在现在的能量下,那一种模型最反映实际.为此我们必须分别模拟这三种机制,因为实践是检验真理的唯一标准,把模拟结果与实验结果比较,决定优劣.

II. 反应终态粒子在实验装置中的运输 在一定的实验装置下,每次反应的终态粒子可以打中该装置中的某些探测器,实验上所记录到的数据,正是反应终

面计算公式得出 $e^+e^- \rightarrow h$ 的全截面 σ .

§ 3. 蒙特卡洛计算

从 § 2 的流程图中看出,模拟一个物理过程而制造的蒙特卡洛磁带和实验磁带都放到相同的程序中

态粒子在实验装置里各个被击中的探测器中的能量和时间讯息,这些量分别用 ADC 和 TDC 数值表征,所以为了与实验比较,单单作相互作用机制的模拟还不够,还必须模拟终态粒子在实验装置上所留下的能量和时间讯息.反应终态粒子在实验装置的运输过程的模拟可以采取不同的方案,例如,我们可以对每一个粒子跟踪其在实验装置中发生的所有过程,各种相互作用,电离能损,多次散射,逐步地跟踪下去,但我们注意到这样做不仅十分复杂,而且要花费大量的计算机时间.由于我们的兴趣只在于终态粒子在探测装置上所留下的能量和时间信息,故我们可以撇开这些粒子在探测器中的具体遭遇,设法得出终态粒子在各种情况下(不同能量、不同方向)在探测装置中所留下的能量和时间信息.为此可采用试验束的方法,即使用一定能区内的电子、 π 介子和 μ 子试验束,研究这些束流与实验装置的作用,将其结果作为我们模拟这些过程的参数.为了这个目的,我们做这样的模拟试验,把部分实验装置放到试验束流上,研究各种情况下(即不同种类,不同能量和不同方向)的束流打在实验装置时,在各个探测器上所留下的时间信息(TDC 值)和能量信息(ADC).这种信息都有一定的分布,而这种分布正是我们用蒙特卡洛方法模拟各种相应的特定情况的参数.利用束流试验的结果,我们就可用蒙特卡洛方法模拟各种能量、各种方向的终态粒子在实验装置中所留下的能量信息 ADC 值和时间信息 TDC 值.当把信息写在磁带上时,我们必须采用与实验磁带相同格式(编码)以便送到相同的程序中进行分析.

有了上面介绍的两步模拟,蒙特卡洛磁带也就制成了.

§ 4. 对数据磁带的分析

I. 数据磁带上的信息 在数据磁带上记录的是反应终态产物在探测器中留下的能量信息和时间信息.为了便于用专门的程序对数据进行分析,在磁带中记录到的信息是有一定次序的,对每一个记录的事例,大体有这样的格式,首先是字头消息,它给出了该事例的字长(即信息量的数量),该事例所满足的触发类型,事例记录到的时间,事例的编号,接着记录了该事例在探测器中所留下的能量信息和时间信息,即被该事例的终态粒子所打中的计数器的 ADC 和 TDC 值,漂移室中触发丝的 TDC 值,这些数值也是按照设计好的次序记录的.正是这种规定的格式保证了在分析时准确知道磁带中各个信息的确切意义.

II. 径迹的重建 如何重建终态粒子径迹的呢,也即如何决定终态每一个粒子径迹的能量与方向呢.图 3 是马克-杰实验利用计数器 A、B 和 C 决定终态粒子极角 θ 方向的示意图,在那儿没有磁场.步骤是这样的,首先决定该终态粒子在 A、B、C 计数器击中的位置.这个位置是很容易从这些计数器两端输出的能量

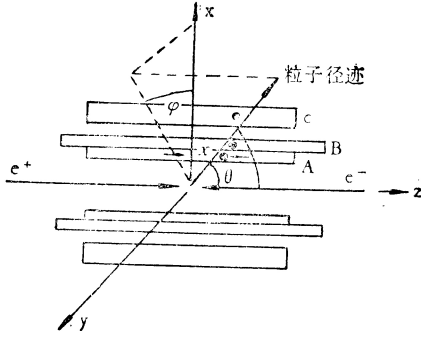


图3 径迹重建示意图 A、B、C中的黑圆点表示计数器被打中的位置， θ 、 φ 见图示

讯息和时间信息中求出。比如我们知道了计数器A两端输出的时间差 Δt ，则A被击中的位置坐标 $x = v\Delta t/2$ ，这儿 v 是A对光的收集速度。这些光是在计数器A被终态粒子击中的地方产生的，它们以速度 v 向两端输运。但问题是由这种方法定出的A、B和C的击中点一般不正好在一条直线上，怎么办呢？这时，通过加权的最小二乘法定出该直线的最佳拟合，而权重因子正比于相应的计数器能量信息的大小。

上面介绍了用计数器两端的时间讯息定出该粒子极角 θ 的方向，至于如何定出方位角 φ 的方向，限于篇幅，就不讨论了。此外，终态粒子击中漂移室丝平面的位置也很容易求出，即在触发丝的位置上加上漂移距离就行了。

下面再简单介绍一下如何决定终态粒子的动量和能量。在马克-杰实验中，测定了 μ 子动量以及电子（包括 e^+ 、 τ ）和强子的能量。

μ 子有很强的穿透力，它可穿过厚约一米的磁铁，通过测定 μ 子在磁铁前后的偏转，就可决定它的动量。在马克-杰实验中，正负电子能量是由电磁量能器决定的，这是一种铅层和闪烁体的夹层结构，闪烁体是取样元件，电磁粒子（ e^\pm 和 τ ）在簇射介质铅中产生的次级粒子穿过取样元件，沉积了部分能量，这部分沉积能量是与介质中耗损的能量有一定的函数关系，这关系可由试验束的实验决定，故取样元件中的能量就可定出介质中的耗损能量。强子量能器的结构与电磁量能器差不多，不同的是，电磁簇射介质选用辐射截面大的介质，如铅，而强子簇射介质选用核作用截面大的介质，如铁。在马克-杰实验中，簇射介质选得足够厚，几乎能全部吸收电子和强子，这样由取样元件得出的能量沉积就可推出终态初始电子（包括 e^+ 和 τ ）和强子的能量。

III. 对某些参数进行分析 常常要作参数的分析，例如在研究三喷注现象时，要对强子事例的能流分布作分析。这时首先我们必须根据强子事例的特点在离线分析中定出一些选择标准，把强子事例选出来逐个

分析。在对强子事例的分析中，我们重建每一根强子能流，即 $E_i(\theta, \varphi)$ ，然后根据冲度的定义，即 $T = \max_i$

$$\sum_i E_i \cdot e_1 / \sum_i |E_i|, \text{ 找一个方向 } e_1 \text{ 使得每根强子能流在该方向上投影的绝对值之和为极大。在垂直于 } e_1 \text{ 的平面上找长轴 } e_2, \text{ 使得各个 } E_i \text{ 在该方向上的投影的绝对值之和最大，即长轴量} = \max \cdot \sum_i |E_i \cdot e_2| / \sum_i |E_i|; e_3; \text{ 垂直于 } e_1、e_2 \text{ 的轴即为短轴 } e_3, \text{ 短轴量} = \min \sum_i |E_i \cdot e_3| / |\Sigma_i|.$$

找到了这几根轴，在冲度轴和长轴的平面上就不难能流分布图了。将该平面分成若干分，36分，对每个强子事例中的每根能流在相应的角度间隔作统计，在适当的选择下（比如对强子事例的冲度 T 和扁度 O 有一定的选择），即得显示三喷注现象的能流分布。见图4。

在本文结束前，用示意图5来说明三喷注现象的离线分析工作概貌，从示意图中也可看出蒙特卡洛计算、分析和实验之间的关系。蒙特卡洛磁带和实验磁带是送到相同的程序中分析。用不同的强子产生机制模型可得不同的蒙特卡洛结果，为了选取最合适的作用机制，我们采用数理统计中假设检验的理论，把每一种模型的蒙特卡洛能流分布与实验的能流分布比

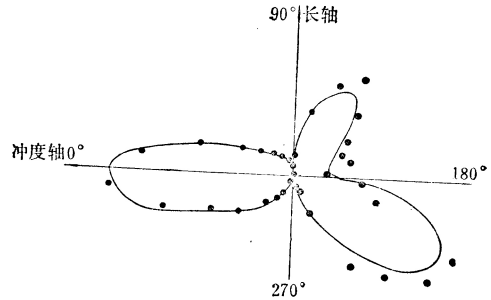


图4 $T(\text{冲度}) < 0.8$ 和扁度 $O_b > 0.1$ 的强子事例的能流分布。 $O_b = (\text{长轴量} - \text{短轴量}) / \sum |E_i|$ ，实曲线是 QCD 理论预言

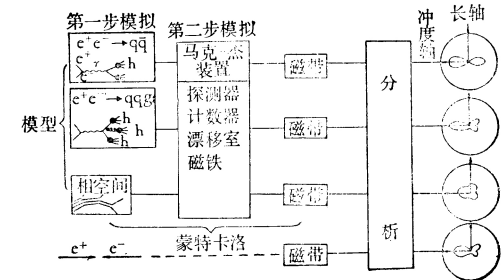


图5 三喷注分析过程图示 第一步模拟结果得到终态粒子的种类，数目 n ，每个粒子的动量和方向 θ 、 φ ；第二步模拟结果得到被终态粒子打中的计数器的 ADC、TDC 值，被打中的漂移室着火丝的 TDC 值

较,最后的分析表明,包括胶子的 $q\bar{q}g$ 的机制最合适.

§ 5. 离线分析与大型计算机

在高能实验中,数据分析的工作不仅量大,而且十分复杂,以马克-杰组为例,在正负电子质心能量 $\sqrt{s} = 27.7\text{GeV}$,亮度 $\mathcal{L} = 1.0 \times 10^{30}/\text{Cm}^2 \cdot \text{sec}$ 的情况下,5个小时记一盘磁带,以全部触发率为 2.5 次/秒计算,在这一盘上记录的事例约为 50000 个,但是其中强子事例和 μ 子事例却是为数极少,在那么多的本底上来寻找、分析极稀有的强子、 μ 子事例,当然需要做大量的分析工作.现代高能物理实验组中差不多有一半的人并不在实验室工作,而是在计算中心作数据分析,在马克-杰组就有二十几个人作离线分析,该组平均一天在 IBM370/168 计算机(~ 300 万次/秒)上需用

8—10 个小时,可见运算量之大.故每个实验中心都是计算中心.欧洲联合核子研究所具有欧洲最强的计算能力,其它如美国的史坦福、布鲁克海汶的高能实验所,也都具有第一流的计算中心.汉堡的电子同步加速器中心 (DESY) 也拥有很大的计算中心,那儿有两台 IBM370/168,一台 370/3033 (~ 500 万次/秒,内存 6MB),有 50 个终端供用户使用,且有完善的程序库和良好的服务系统.因在高能物理领域国际交流十分频繁故这些计算中心的硬、软件设备是十分通用的.

在高能物理中的离线分析工作就简单介绍到这儿,但应指出的是,离线分析工作还包括物理选题和实验设计,限于篇幅,这些内容就不讨论了.

(题头: 顾晨曦)